

焊接先进技术

ADVANCED TECHNOLOGY OF WELDING

上海市焊接协会 编 著
上海市焊接学会

上海科学技术文献出版社

焊接先进技术

上海市焊接协会 编著
上海市焊接学会

上海科学技术文献出版社

《焊接先进技术》

编委会名单

编委会主任：吴毅雄

编委会副主任：徐域栋 王 钺 徐 锋 施桂兴

主 编：吴祖乾

副主编：陆 皓 亓安芳

委 员：唐新华 姚君山 刘金合 华学明

林 涛 姚 舜 邓 健 徐国祥

杨智问 卢征然 傅育文 杨惠勤

姜建锋 刘 霞 杨学勤 邬美华

陈家本 朱光照 陈立功 汪建华

序

焊接从技艺走向科学,以科学支撑技术是焊接技术发展的必然路径。综观全球焊接技术的发展历程,无论是从旋转摩擦焊到线性摩擦焊再到搅拌摩擦焊,还是从单丝气体保护焊到双丝气体保护焊再到多丝气体保护焊;也无论是从单激光焊到激光组合焊再到激光复合焊,还是从交流工频电阻焊到直流工频电阻焊再到变频伺服电阻焊,都无不印证了这样一个规律:技术——科学——技术的螺旋上升的发展轨迹。

中国近几十年的强劲崛起,奠定了目前世界制造大国的地位,其正面效应是世界离不开中国,中国已成为世界政治与经济多元中不可或缺的一元;但不容忽视的是,中国扮演着世界加工厂的角色,主要活跃在低端的经济活动中,特别在制造工艺方面缺乏足够的革新活力和能量。随着我国工业基础和技术基础的提高、国家战略需求的增长,以及各行业振兴计划的出台,作为主要制造工艺之一的焊接技术,由于承担着保障国家国防安全、经济安全和民生安全的时代使命,因而有着极大的发展和应用空间。

《焊接先进技术》一书围绕近几年在工业生产方面得到广泛应用的先进焊接技术进行了较详细的介绍,希望能对广大焊接工作者带来有益的借鉴和帮助。

本书是上海焊接学会和上海焊接协会通力协作的智慧结晶,是上海全体焊接工作者长期从事焊接研究和焊接生产的知识积累。直接参与编写的人员为此耗费了大量心血,在此表示由衷的敬意和真诚的谢忱!

此外,还要向为本书顺利出版作出重要贡献的上海焊接协会的程美琳老师、上海焊接学会的邵宪钧老师,在此也表示衷心感谢!

本书的出版得到了上海科学技术文献出版社的大力支持和帮助,在此请允许我代表上海焊接学会和上海焊接协会表示最诚挚的谢意!

《焊接先进技术》编委会主任

吴毅雄

前 言

随着国民经济的高速发展,焊接新工艺、新技术不断涌现。近年来,各种焊接先进技术,如激光复合焊、搅拌摩擦焊、热丝 TIG 焊、数字化焊接电源、高效电弧焊接、先进钎焊技术、先进切割技术、焊接数值模拟技术等在生产各个领域都得到广泛的应用。显而易见,与以往相比,焊接技术确实上了一个新的台阶。

为了进一步推广焊接先进技术的应用,上海市焊接协会和上海市焊接学会受上海科学技术文献出版社委托,组织了本市一批造诣较深的焊接专家共同编写了这本《焊接先进技术》,以供广大读者在选用焊接方法和制订焊接工艺时参考。

本书共分十章:第一章为《激光焊接技术》,由唐新华教授编写;第二章为《数字化焊接电源技术》及第八章《高效电弧焊接技术》,由华学明副教授编写;第三章为《搅拌摩擦焊和线性摩擦焊技术》,由姚君山博士和刘金合教授编写;第四章为《焊接机器人应用技术》,由林涛副教授编写;第五章为《焊接数值模拟技术》,由陆皓教授编写;第六章为《材料切割技术》,由姚舜教授编写;第七章为《钎焊先进技术》,由邓健教授级高级工程师和姚舜教授编写;第九章为《表面堆焊技术》,由徐国祥教授编写;第十章为《焊接先进技术在生产中的应用》,由亓安芳教授级高级工程师组织编写,本章涉及锅炉、压力容器、汽轮机、造船、汽车、航天、钢结构和振动消应等领域,参加编写的有杨智问、卢征然、傅育文、杨惠勤、姜健锋、刘霞、杨学勤、邬美华、陈家本、朱光照、陈立功和汪建华等专家。全书由吴毅雄教授和吴祖乾教授级高级工程师审校定稿。

本书在编写过程中得到上海市焊接协会和上海市焊接学会秘书处的的大力支持,同时也得到上海施威焊接产业有限公司的鼎力资助,在此深表谢意。

书中不足之处在所难免,万望读者不吝赐教。

主 编 吴祖乾

目 录

第一章 激光焊接技术	(1)
第一节 概 述	(1)
一、激光物理基础	(1)
二、常用激光器及其分类	(13)
三、激光加工及其应用	(14)
第二节 激光焊接原理	(15)
一、激光与物质的相互作用	(15)
二、光致等离子体行为	(17)
三、激光焊接的基本原理	(18)
四、激光焊接特点	(20)
五、激光焊接影响因素	(21)
第三节 激光焊接技术及其应用	(30)
一、激光焊接技术	(30)
二、金属材料的激光焊接	(36)
三、激光焊接控制技术	(39)
第四节 激光焊接系统	(41)
一、激光焊接系统的组成	(41)
二、CO ₂ 激光器	(43)
三、YAG 激光器	(45)
四、半导体激光器	(47)
五、光纤激光器	(48)
第五节 激光焊接安全与防护	(49)
一、激光辐射的危害及其分类	(50)
二、激光安全防护技术	(52)
三、激光加工安全防护标准	(53)
第二章 数字化焊接电源技术	(56)
第一节 数字化焊接电源特征及优点	(56)
一、数字化焊接电源特征	(56)
二、数字化焊接电源优点	(57)
第二节 焊接电源—电弧系统控制数字化	(59)
一、数字化焊接电源结构形式	(59)
二、数字化焊接电源人机界面数字化技术	(65)
三、数字化焊接电源的专家系统	(67)
四、数字化焊接电源的通信技术	(68)
第三节 数字化焊接电源焊接质量监控和网络化控制	(73)
一、数字化焊接电源焊接质量监控	(73)

二、数字化焊接电源的监控网络化·····	(75)
第四节 数字化焊接电源焊接新工艺·····	(77)
一、STT 表面张力过渡数字控制 ·····	(77)
二、冷金属过渡焊接技术·····	(80)
三、双脉冲 MIG 焊铝技术 ·····	(85)
四、交流方波埋弧焊工艺·····	(87)
第三章 搅拌摩擦焊和线性摩擦焊技术·····	(90)
第一节 搅拌摩擦焊·····	(90)
一、概述·····	(90)
二、搅拌摩擦焊原理与工艺特性·····	(90)
三、搅拌工具·····	(91)
四、铝合金搅拌摩擦焊·····	(96)
五、搅拌摩擦焊接头缺陷、检测与补焊 ·····	(104)
六、搅拌摩擦焊工程应用·····	(106)
第二节 线性摩擦焊·····	(111)
一、概述·····	(111)
二、线性摩擦焊原理与工艺特征·····	(112)
三、线性摩擦焊接头缺陷·····	(114)
四、线性摩擦焊设备·····	(114)
五、线性摩擦焊工程应用·····	(115)
第四章 焊接机器人应用技术·····	(119)
第一节 焊接机器人概论·····	(119)
一、焊接机器人分类·····	(119)
二、焊接机器人系统组成·····	(121)
三、焊接机器人选择准则(建议)·····	(123)
第二节 焊接机器人工作原理·····	(124)
一、机器人运动学·····	(124)
二、焊接机器人驱动方式·····	(128)
三、焊接机器人控制技术·····	(129)
第三节 典型焊接机器人系统·····	(130)
一、点焊机器人工作站·····	(131)
二、弧焊机器人工作站·····	(133)
三、切割机器人工作站·····	(137)
四、群控机器人工作站·····	(139)
第四节 焊接机器人技术发展·····	(140)
一、焊接导引与焊缝跟踪·····	(140)
二、焊接机器人离线编程控制·····	(141)
三、焊接机器人远程控制·····	(142)
四、焊接机器人焊接质量控制·····	(144)

第五章 焊接数值模拟技术·····	(148)
第一节 焊接数值模拟技术概述·····	(148)
一、数值模拟技术·····	(148)
二、有限元软件的发展历史·····	(148)
三、通用有限元软件概述·····	(149)
四、通用软件对焊接温度场应力场的模拟·····	(150)
第二节 焊接热过程的数值模拟·····	(152)
一、概述·····	(152)
二、焊接热传导·····	(153)
三、焊接熔池中的传热和流体流动·····	(155)
四、MIG 焊熔滴长大与过渡·····	(158)
五、焊接电弧的传热传质过程·····	(166)
第三节 焊接力学的数值模拟·····	(169)
一、焊接变形的预测与控制·····	(169)
二、考虑相变的焊接残余应力分析·····	(179)
三、局部焊后热处理力学行为分析·····	(180)
第六章 材料切割新技术·····	(183)
第一节 等离子弧切割·····	(183)
一、切割等离子弧·····	(183)
二、等离子弧切割工作原理与特点·····	(184)
三、等离子弧切割工艺·····	(184)
四、空气等离子弧切割·····	(185)
五、氧气等离子弧切割·····	(186)
六、水下等离子弧切割·····	(187)
七、水再压缩等离子弧切割·····	(189)
八、精细等离子弧切割·····	(191)
第二节 激光切割·····	(192)
一、激光切割的特点·····	(192)
二、激光切割原理·····	(192)
三、激光切割分类·····	(193)
四、激光切割工艺参数·····	(193)
五、氮气辅助 CO ₂ 激光切割·····	(194)
六、氧辅助激光切割·····	(195)
七、激光汽化切割法·····	(198)
八、水导引激光切割·····	(199)
九、激光热应力切割·····	(199)
十、低功率激光切割·····	(201)
第三节 高压水射流切割·····	(201)
一、水射流切割工艺特点·····	(201)
二、高压水射流切割原理·····	(202)
三、水射流切割分类·····	(203)

4 焊接先进技术

HAJIE XIANJIN JISHU

四、切割头和喷嘴·····	(203)
五、高压水射流切割工艺·····	(204)
六、水射流切割应用·····	(206)
第四节 切割自动化·····	(208)
一、CNC 数控切割·····	(208)
二、机器人切割·····	(211)
第七章 钎焊先进技术·····	(219)
第一节 钎焊概述·····	(219)
一、材料钎焊基本原理·····	(219)
二、钎焊技术发展动态·····	(223)
第二节 无铅软钎焊技术·····	(225)
一、无铅软钎料·····	(225)
二、波峰焊·····	(226)
三、再流焊·····	(229)
第三节 电弧钎焊技术·····	(230)
一、电弧钎焊的特性·····	(230)
二、TIG 电弧钎焊技术·····	(231)
三、MIG 电弧钎焊技术·····	(232)
第四节 电子束钎焊技术·····	(235)
一、电子束钎焊特点·····	(235)
二、电子束钎焊的开发与应用·····	(236)
三、扫描电子束真空钎焊系统·····	(237)
四、电子束扫描轨迹的生成系统·····	(238)
五、毛细管板扫描电子束钎焊试验·····	(241)
第八章 高效电弧焊接技术·····	(247)
第一节 不同保护气体高熔敷率 MAG 焊接技术·····	(247)
一、TIME 焊接技术·····	(247)
二、LINFAS [®] T 焊接工艺及其特点·····	(249)
三、RAPID MELT 焊接工艺及其特点·····	(251)
四、RAPID ARC 焊接工艺及其特点·····	(252)
五、不同保护气体成分高效焊接熔滴过渡形式·····	(252)
六、高效 MAG 焊焊接材料·····	(255)
第二节 多丝熔化极气保护焊焊接技术·····	(256)
一、概述·····	(256)
二、Tandem 焊接技术·····	(256)
三、双丝(或多丝)气保护焊接技术·····	(261)
四、双丝气电立焊·····	(264)
第三节 多丝埋弧焊技术·····	(265)
一、概述·····	(265)
二、多电源串列双(多)丝埋弧焊技术·····	(266)

三、单电源串联双丝埋弧焊技术·····	(269)
四、单电源并列双(多)丝埋弧焊技术·····	(270)
五、热丝填丝埋弧焊技术·····	(270)
六、金属粉末多丝埋弧焊技术·····	(272)
第九章 表面堆焊技术·····	(274)
第一节 概 述·····	(274)
一、表面堆焊基本特点和原理·····	(274)
二、表面堆焊分类·····	(274)
三、表面堆焊应用现状和前景·····	(274)
第二节 电弧表面堆焊技术·····	(275)
一、手工电弧表面堆焊·····	(275)
二、等离子弧表面堆焊·····	(278)
三、埋弧自动表面堆焊·····	(281)
四、气体保护熔化极表面堆焊·····	(287)
五、振动电弧表面堆焊·····	(291)
第三节 激光熔敷技术·····	(292)
一、激光熔敷特点·····	(292)
二、激光熔敷设备·····	(293)
三、激光熔敷工艺·····	(293)
四、激光熔敷实例·····	(295)
五、激光熔覆的发展方向·····	(299)
第十章 焊接先进技术在生产中的应用·····	(301)
第一节 发电设备焊接新技术与应用·····	(301)
一、脉冲埋弧焊接技术及其在锅炉膜式水冷壁制造中的应用·····	(301)
二、热丝 TIG 焊接技术及其在锅炉部件制造中的应用·····	(305)
三、马鞍形埋弧自动焊接技术及其在锅炉汽包管座制造中的应用·····	(316)
四、集箱环缝自动焊接技术及其应用·····	(323)
五、内孔氩弧焊接技术及其在锅炉汽包管座制造中的应用·····	(333)
六、窄间隙焊接技术及其在汽轮机转子制造中的应用·····	(337)
第二节 船舶建造焊接新技术与应用·····	(342)
一、双丝埋弧焊技术与应用·····	(342)
二、焊剂垫单面埋弧焊接技术与应用·····	(346)
三、焊剂铜衬垫多丝单面埋弧焊接技术与应用·····	(353)
四、软衬垫单面埋弧焊接技术与应用·····	(362)
五、双丝单面 MAG 焊焊接技术与应用·····	(370)
第三节 建筑钢结构焊接新技术与应用·····	(373)
一、钢结构在一些领域里的不可替代性·····	(373)
二、钢结构的焊接方法拾遗·····	(374)
三、近年来国内建筑钢结构的新成就拾零·····	(381)
四、国内外建筑钢结构的新动态点滴·····	(391)

第四节 汽车行业焊接新技术与应用·····	(394)
一、概述·····	(394)
二、汽车焊接特点·····	(395)
三、焊接新技术在汽车行业中的应用·····	(395)
第五节 航天制造焊接新技术与应用·····	(401)
一、概述·····	(401)
二、铝合金结构的焊接·····	(401)
三、钛合金结构的焊接·····	(407)
四、异种材料结构的焊接·····	(410)
第六节 振动消应力技术与应用·····	(412)
一、概述·····	(412)
二、振动时效技术·····	(412)
三、振动焊接技术·····	(414)
四、振动消应力技术在工业中的应用·····	(415)
五、振动焊接在大直径全焊接阀体中的应用·····	(417)

第一章 激光焊接技术

第一节 概 述

自从 20 世纪 60 年代第一台激光器问世以来,激光对于人类的社会生活产生了广泛而深刻的影响,不仅被广泛应用于科学技术研究的各个前沿领域,而且在现代工业、农业、医学、商业、通讯、测量、军事乃至人们的日常生活等各个方面都得到了广泛的应用。激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性对材料进行切割、焊接、表面处理、打孔、雕刻和微加工等的一种加工新技术,涉及到光、机、电、材料及检验等多门学科,目前已经从特殊用途的加工技术变为通用的、具有多种加工能力的精加工技术。激光因此也被誉为“万能加工工具”和“未来制造系统的共同加工手段”,成为 21 世纪最具发展潜力的加工技术之一。激光焊接是一种用高能密度的激光束作焊接热源,通过激光与材料(包括金属和非金属)的相互作用,对材料连接部位进行局部加热熔化,经冷却凝固后形成牢固的永久性连接头的技术。激光焊接技术是目前诸多激光加工技术中应用最多的一种技术手段,在航空航天、汽车、船舶等制造领域已获得大量应用。与传统的焊接技术相比,激光焊接具有显著的优质、高效的特点,并在焊接某些高强、高性能特殊材料方面表现出极大的优越性,这为其在工业制造领域中的获得更为广泛的应用提供了技术基础。

本章在简要介绍激光产生原理、模式和相关特征参数的基础上,将主要阐述激光焊接的原理、特点以及影响激光焊接的各种因素,并在此基础上介绍各种激光焊接技术的工艺特点和应用场合、各种典型金属材料的激光焊接工艺、激光焊接过程中的控制技术,然后简单介绍几类目前用于激光焊接的系统及其相关设备,最后介绍激光焊接的有关安全知识和防护措施。

一、激光物理基础

(一) 激光产生的原理

激光(Laser)意为“受激发射辐射的光放大”(light amplification of stimulate emission radiation),是利用原子或分子受激辐射的原理,使工作物质受激而产生的一种单色性高、方向性强、亮度高的光束。受激辐射概念是爱因斯坦于 1917 年首先提出的。普朗克在 1900 年用辐射量子化假设成功解释了黑体辐射分布规律,波尔在 1913 年提出原子中电子运动状态量子化假设。在此基础上,爱因斯坦从光子概念出发,重新推导了黑体辐射的普朗克公式,并在推导中提出了两个极为重要的概念:自发辐射和受激辐射。40 年后,受激辐射概念在激光技术中得到了应用。

1. 原子的能级

各种发光现象都与光源内部原子的运动状态有关。每个原子由一个带正电荷的原子核和若干个带负电荷的电子组成,这些电子在有限个可能的轨道上围绕原子核旋转。电子绕原子核旋转有一定的动能,电子被原子核吸引有一定的位能,两者之和就是电子的内能。若由于外界的作用使电子与原子核的距离增大,则内能增大;距离缩小,则内能减少。而物质的发光与内能直接有关。

波尔的原子中电子运动状态量子化假说指出,原子存在某些定态,在这些定态中不发出也不吸收电磁辐射,原子定态能量只能采取某些分立值 $E_1, E_2, \dots$, 这些定态能量的值称为能级。只有当原子从一个定态跃迁到另一个定态时,才发出或吸收电磁辐射。按照光子假设,电磁辐射的最小单元是光子,其能量为 $h\nu$ 。

电子通过能级跃迁可以改变其轨道,当它从离核较远的轨道(高能级)跃迁到离核较近的轨道(低能级)上时就发射光子,而从离核较近的轨道跃迁到离核较远的轨道上时则需要吸收光子。每个跃迁

对应一个特定的能量和波长。与跃迁对应的高能级能量 E_2 和低能级能量 E_1 满足关系式

$$E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-1)$$

式中: h 为普朗克常数 ($h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$); c 为真空中的光速 ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$); ν 为频率; λ 为波长。

2. 能级的分布

物质结构在热平衡状态下,各能级上原子的数目服从一定的规律。设原子体系的热平衡温度为 T ,在能级 E_n 上的原子数为 N_n ,则有

$$N_n \propto e^{-\frac{E_n}{kT}} \quad (1-2)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数 ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)。该统计规律称为玻尔兹曼正则分布律。

上式表明,随着能量 E_n 的增高,粒子数 N_n 按指数规律递减(图 1-1)。若设 E_1 和 E_2 分别为任意两个高低能级,且 $E_2 > E_1$,则由玻尔兹曼正则分布律,两能级上的原子数之比为

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} < 1 \quad (1-3)$$

上式表明,在热平衡状态下,低能级上的粒子数 N_1 总是大于高能级上的粒子数 N_2 。原子能级中能量最低的能级称为基态,其他的能级称为激发态。基态是粒子能量最平衡最稳定的状态,粒子总是力图使自己的能量状态处于基态上;被激发到高能级上的粒子,也总是力图回到基态上去,与此同时释放出激发时所吸收的能量。从高能级回到低能级的过程称为跃迁,跃迁时释放的能量即为辐射。

3. 自发辐射、受激辐射和受激吸收

物质的原子、分子和离子辐射光和吸收光的过程与原子的能级之间的跃迁相关。对于由大量同类原子组成的系统,原子能级数目很多。为简单说明问题,我们以原子的两个能级之间的跃迁过程为例来分析它们之间的跃迁规律。光与物质的相互作用有 3 种不同的基本过程,即:自发辐射、受激辐射和受激吸收。

这里用 E_1 和 E_2 分别表示两个能级, E_1 为低能级, E_2 为高能级(即 $E_2 > E_1$, 且它们满足辐射跃迁选择定则)。由于粒子所含的能量不同,由式(1-3)可知,在热平衡状态下,低能级(E_1)上的粒子数目大于高能级(E_2)上的粒子数。

自发辐射、受激辐射和受激吸收的跃迁过程如图 1-2 所示。

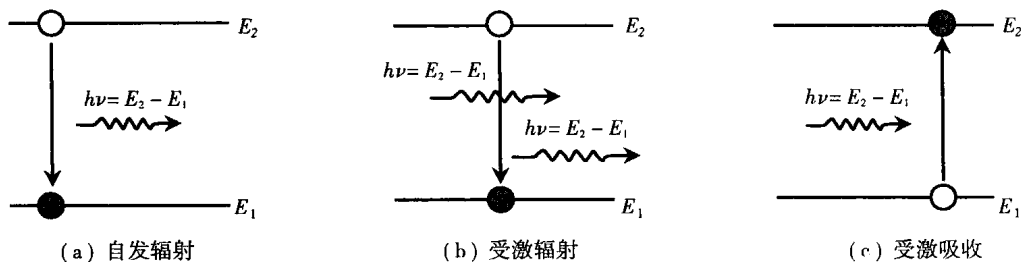


图 1-2 三种跃迁过程

(1) 自发辐射 通常处于低能级 E_1 的粒子是比较稳定的,而处于高能级 E_2 的粒子是不稳定的,在没有外界影响时,它们会自发从高能级 E_2 向低能级 E_1 跃迁,同时向外发射出一个能量为 $h\nu$ ($h\nu =$

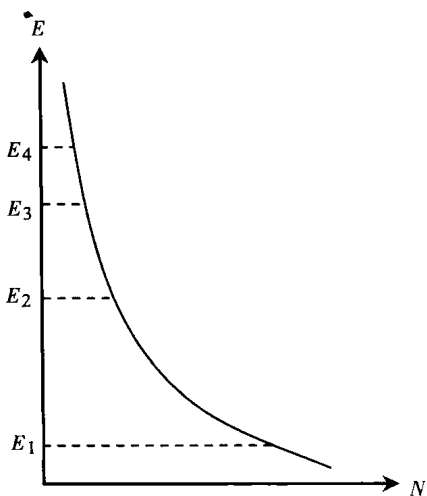


图 1-1 玻尔兹曼分布率

$E_2 - E_1$) 的光子, 这种过程称为自发跃迁。由原子自发跃迁发出的光波称为自发辐射。自发跃迁过程用自发跃迁概率 A_{21} 描述。 A_{21} 定义为单位时间内 N_2 个高能级原子中发生自发跃迁的原子数与 N_2 之比, 即

$$A_{21} = \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{sp} \frac{1}{N_2} \quad (1-4)$$

式中: $(dN_{21})_{sp}$ 为由 E_2 向 E_1 自发跃迁的原子数。 A_{21} 也称为自发跃迁爱因斯坦系数。自发跃迁是一种只与原子本身性质有关而与辐射场无关的自发过程。自发跃迁概率 A_{21} 就是原子在能级 E_2 的平均寿命 τ_s 的倒数, 即

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_s} \quad (1-5)$$

自发辐射是个随机过程, 大量原子的自发辐射场的相位是不相干的, 辐射场的传播方向和偏振态也呈无规则分布。

(2) 受激辐射 另一种发射过程是处于高能级 E_2 上的原子, 在频率为 ν 的辐射场作用下, 跃迁至低能级 E_1 并辐射一个能量为 $h\nu$ 的光子, 这种过程称为受激辐射跃迁。受激辐射跃迁发出的光波称为受激辐射。受激辐射跃迁概率为

$$W_{21} = \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{N_2} = B_{21}\rho_\nu \quad (1-6)$$

式中: B_{21} 为受激辐射跃迁爱因斯坦系数; ρ_ν 为辐射场单色能量密度, 定义为单位体积内, 频率处于 ν 附近的单位频率间隔中的电磁辐射能量。受激辐射跃迁概率 W_{21} 不仅与原子性质有关, 还与辐射场的 ρ_ν 有关。

(3) 受激吸收 处于低能级 E_1 的一个原子, 在频率为 ν 的辐射场作用下, 吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子, 跃迁至高能级 E_2 , 这种过程称为受激吸收跃迁。受激吸收跃迁概率为

$$W_{12} = \left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{N_1} = B_{12}\rho_\nu \quad (1-7)$$

式中: $(dN_{12})_{st}$ 为由 E_1 向 E_2 受激跃迁的原子数; B_{12} 为受激吸收跃迁爱因斯坦系数。受激吸收跃迁几率不仅与原子性质有关, 还与辐射场的 ρ_ν 有关。

在热平衡状态下, 腔内原子数按能级分布应服从热平衡状态下的玻尔兹曼分布, 并且单位时间内由能级 E_1 向 E_2 跃迁的原子数与由能级 E_2 向 E_1 跃迁的原子数应当相等, 即

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{sp} + \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{st} = \left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{st} \quad (1-8)$$

受激辐射与自发辐射最重要的区别在于相干性。自发辐射是原子在不受外界辐射场控制情况下的自发过程。大量原子的自发辐射场的相位是不相干的, 辐射场的传播方向和偏振态也是无规则分布, 而受激辐射是在外界辐射场控制下的发光过程, 因此受激辐射场的频率、相位、传播方向和偏振态与外界辐射场完全相同。激光就是一种受激辐射的相干光。

以上 3 种过程在一个包含大量原子的系统中总是同时存在并紧密联系的。在不同情况下, 每个过程所占的比例不同, 普通光源中自发辐射起主要作用, 激光器工作过程中受激辐射起主要作用。

4. 粒子数反转

光通过介质时, 受激辐射和受激吸收同时存在。若受激辐射的光子数多于受激吸收的光子数, 即在 dt 时间内受激辐射和受激吸收的光子数之差 $dN_{21} - dN_{12} > 0$, 则对外表现为光的放大; 反之, 若 $dN_{21} - dN_{12} < 0$, 则对外表现为光的吸收。要实现 $dN_{21} - dN_{12} > 0$, 必须使高能级上的粒子数 N_2 大于低能级上的粒子数 N_1 , 即 $N_2 > N_1$, 这种状态称为粒子数反转。

但是根据玻尔兹曼分布率, 在热平衡状态下, 低能级上的粒子数 N_1 总是大于高能级上的粒子数 N_2 , 所以当光通过介质时, 受激吸收占优势, 对外表现的总是光的吸收。因此, 热平衡状态下实现粒

子数反转是不可能的。只有当外界向介质提供能量时,使介质处于非平衡状态下,才可能实现粒子数反转。在这种状态下,若有一束光通过介质,而光子的能量恰好等于高低能级的能量差,就可以产生受激辐射,使输出的光能量超过入射的光能量,此时介质对光有增益作用。

产生粒子数反转分布的介质称为激活介质,通常称为激光器的工作物质。形成粒子数反转分布是产生激光的必要条件。

5. 实现粒子数反转的条件

要实现粒子数反转,介质本身的能级结构应当存在亚稳态,即寿命 τ_s 相对较长的高能级,以利于高能级上粒子数的积存;同时必须采用外界激励方式向介质提供能量,外界激励的过程又称为泵浦。对于不同类型的介质,泵浦的具体方式也不同。通常采用光激励、电激励、化学分解或化合等方式给介质输入一定的能量。从能量的角度看,泵浦过程就是由外界提供能量给粒子体系的过程。激光器中的激光能量,是由激励装置把其他形式的能量(如光、电、热、化学能等)转换而来的。

6. 介质的增益作用

激活介质经外界泵浦实现粒子数反转后,对一定频率的光就具有放大作用,此时的激活介质称为增益介质。介质对光的放大能力用增益系数 G 来描述。如图 1-3 所示,一束光通过增益介质,设它在 $x=0$ 处的光强为 I_0 ,在 x 处的光强为 I ,在 $x+dx$ 处的光强为 $I+dI$,则光的放大作用可表示为

$$dI = G I dx \quad \text{或} \quad G = \frac{dI}{I dx} \quad (1-9)$$

当光在增益介质中由 $x=0$ 处传播到 x 处时,出射光强与入射光强的关系由式(1-9)积分可得

$$I = I_0 e^{Gx} \quad (1-10)$$

上式表明,光强在增益介质中随着距离增大按指数增长。增益系数 G 通常随着粒子数反转程度的增加而上升, G 的大小也与光强 I 和频率 ν 相关。在同样的泵浦条件下,光强越强,单位时间内由亚稳态向下跃迁的粒子数就越多,导致粒子数反转程度减弱,增益 G 下降;对不同频率的入射光,介质的增益系数 G 不同。

7. 光学谐振腔

(1) 谐振腔的作用 激活介质在外界的泵浦下实现了粒子数反转分布后,为光的放大提供了介质增益条件;但介质内的初始光信号来源于自发辐射,无确定的频率和传播方向,通过介质时虽可获得增益得到放大的受激辐射,但其方向是随机的。另外,介质的增益系数和长度也是有限的,光子单次通过激活介质获得的增益较弱,难以形成激光振荡。为此,在激活介质两侧加上一对平行的反射镜,其中一侧为全反射镜,另一侧为部分反射镜。这样使垂直于反射镜的初始光子来回通过激活介质,进一步引发其他亚稳态粒子的受激辐射,产生连锁反应,使光子数目越来越多,引起雪崩式光放大作用,在极短时间内由部分反射镜输出频率和方向性单一的激光(见图 1-4)。这一对反射镜就构成了激光谐振腔。光学谐振腔是激光器的重要组成部分,对激光的形成和激光束的性质有重要影响。光在激活介质内传播实质是光的放大,谐振腔起正反馈的作用,维持光的振荡。在激光谐振腔内,只有传播方向与轴线接近平行的光才能被来回反射形成激光,而其他传播方向的光最终被逸出腔外;因此,激光具有很好的方向性。

(2) 谐振腔的形式 光学谐振腔按不同的分类可以有多种形式,如球面腔和非球面腔、两镜腔和多镜腔、高损耗腔和低损耗腔、端面反馈腔和分布反馈腔、折叠腔和环形腔等。但各种复杂腔都可简化为等效的两镜腔,所以这里只讨论由两个反射镜构成的两镜腔。常用的激光两镜腔的主要形式有

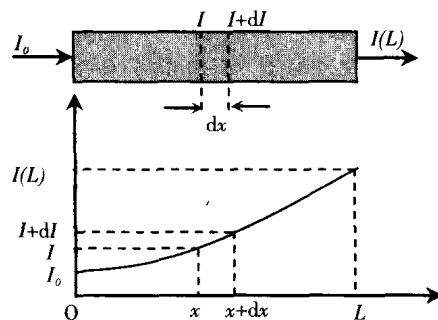


图 1-3 增益介质的光放大

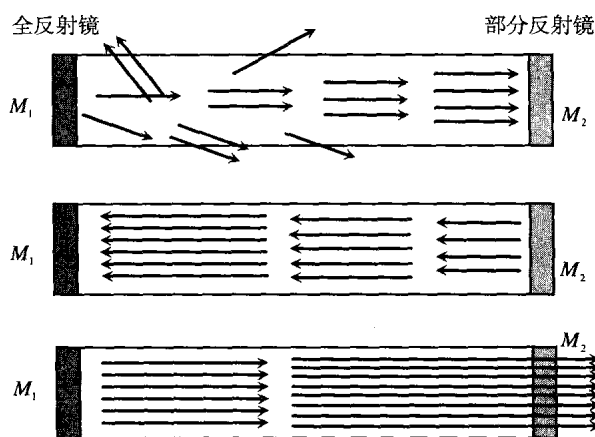


图 1-4 谐振腔的作用

平行平面腔、双凹腔和平凹腔(见图 1-5)。

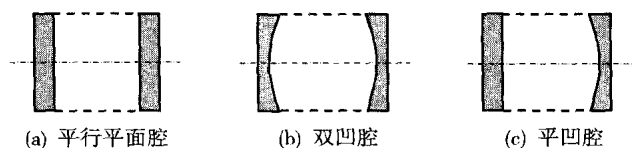


图 1-5 常用激光两镜腔的主要形式

平行平面腔多用于固体激光器;双凹腔由两个凹面反射镜组成,其中一种特殊而常用的形式是共焦腔,即两凹面反射镜曲率半径相同,且两镜间距离等于曲率半径,两镜面与焦点重合,共焦腔衍射损耗小,易调整;平凹腔由一个平面反射镜和一个凹面反射镜组成,其中一种特殊而常用的形式是半共焦腔,相当于共焦腔的一半,它在光学上与共焦腔是等价的。无论哪种形式的谐振腔,两个反射镜中至少有一个是部分透射,或者有某种耦合的机构,以便腔内激光输出。

(3) 谐振腔的稳定性条件 要获得激光器的稳定输出,使傍轴光线能在腔内往返任意多次而不横向逸出腔外,必须使谐振腔达到稳定性条件。利用几何光学的光线矩阵分析方法可以研究光线在腔内往复反射的过程。常用 g 参数来描述激光谐振腔的性质,其定义为

$$g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}, g_2 = 1 - \frac{L}{r_2} \quad (1-11)$$

式中: r_1 和 r_2 分别为两个反射镜的曲率半径,当凹面镜向着腔内时, r 取正值,凸面镜向着腔内时, r 取负值; L 为两个反射镜间的距离,即激光谐振腔的腔长。

根据理论分析,谐振腔的稳定性条件为

$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (1-12)$$

所有满足条件 $g_1 g_2 < 0$ 和 $g_1 g_2 > 1$ 的腔都称为非稳腔。在这些腔内,傍轴光线往返有限次就横向逸出腔外,几何损耗大;所有满足条件 $g_1 g_2 = 0$ 和 $g_1 g_2 = 1$ 的腔都称为临界腔,共焦腔的条件是 $r_1 = r_2 = L$,满足条件 $g_1 g_2 = 0$,平行平面腔的条件是 $r_1 = r_2 = \infty$,满足 $g_1 g_2 = 1$ 。所以它们都是临界腔,其性质介于稳定腔与非稳腔之间。

(4) 谐振腔的谐振条件和阈值 要使激光器产生振荡,应满足以下两个条件:

(a) 振幅条件 光在腔内往返一次,由于激活介质而得到的增益,必须大于或等于此间光的全部损失(包括吸收、散射、衍射、反射以及激光输出损耗)。如果设激活介质的增益系数为 $G(\nu)$,两腔镜的反射率分别为 R_1 和 R_2 ,激光在腔内传播时的损耗系数为 α ,激光器腔长为 L ,则振幅条件可表示为

$$G(\nu) \geq \alpha - \frac{1}{2L} \ln R_1 R_2 \quad (1-13)$$

(b) 相位条件 光在激光谐振腔内往返一次相位的改变为 2π 的整数倍,即形成驻波,才能形成稳定的振荡输出。

另外,由式(1-13)可知,激光器激活介质的增益系数 $G(\nu)$ 必须超过由振荡条件决定的值时,才能产生激光振荡,而激活介质的增益系数 $G(\nu)$ 与粒子反转数 $N_2 - N_1$ 是成正比的,粒子反转数又与泵浦条件有关,所以,激光器泵浦必须超过某一限度,才能满足振荡条件输出激光。这个限度称为激光器的阈值。由式(1-13)可知,谐振腔的阈值增益 G_m 为

$$G_m = -\frac{1}{2L} \ln R_1 R_2 \quad (1-14)$$

阈值是描写激光器整体性能的重要参数,对于不同的工作方式,它有不同的表示,如:对光泵浦的脉冲固体激光器,常用闪光灯的脉冲能量表示;对注入式半导体激光器则用阈值电流来表示;理论分析时,又常用增益系数的阈值来表示;等。

8. 激光的产生

由上述讨论可知,激光的产生应具备 3 个要素:具有亚稳态能级结构的激活介质,即激光工作物质;外界泵浦源,提供能量使上下能级间实现粒子数反转;激光谐振腔,提供正反馈,维持激光的振荡,同时提高了激光的方向性。也就是说,具有亚稳态能级结构的激光工作物质,在足够强的外来光子能量的激发下,吸收外界能量,实现粒子数反转,当光在谐振腔内往返一次所获得的增益足以补偿腔内各种损耗的时候,也就是达到产生激光的阈值条件时,激光便产生。

(二) 激光的基本特点

激光除了普通光所具有的反射、折射、干涉、衍射、偏振等性质外,还具有普通光所没有的优异特性。由于激光器发光是受激辐射,是在外界辐射场的控制下的发光过程,与入射辐射具有相同的频率、相位、传播方向和偏振,因而激光是一种受激辐射的相干光,具有高强度、高方向性、高单色性和高相干性,这些特点使其在各个领域获得广泛应用。

1. 高方向性

普通光源是自发辐射,发光面发出的光向各方向传播,发散角很大,即使做成探照灯,也有 10^{-1} rad 数量级的发散角。而激光是受激辐射,谐振腔对光束方向性的限制,使激光束的发散角很小,一般是毫弧度(10^{-3} rad)数量级。发散角很小,说明激光束的方向性好,使激光束传播到很远的距离仍可保持高强度,这就为各种应用提供了方便。

不同类型的激光器其方向性差别很大,这与激光器的工作物质的均匀性和类型、谐振腔的类型及腔长、激光器的工作状态及激励方式等都有关系。气体激光器的工作物质为气体,其光学均匀性好,方向性最好,发散角可达 10^{-4} rad 数量级;固体激光器由于工作物质的均匀性及泵浦源的激励均匀性较差,其发散角为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ rad 数量级;半导体激光器由于发射激光的半导体晶体的尺寸为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ mm 数量级,存在衍射,发散角很大,约在几度至十几度范围,方向性最差。

2. 高强度

光强度定义为单位时间通过单位面积的能量,单位为 W/cm^2 。普通光源方向性很差,光强度很低;而激光由于谐振腔对光束方向性的限制,光束的发散角很小,所以光强度很高。光的强度有时也用其辐射亮度来描述。一台输出功率为 10 mW 的氦氖激光器,其辐射亮度为 $10^{10} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ [瓦/(球面度·平方米)],比太阳的辐射亮度 $3 \times 10^6 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ 高几千倍。一台较高水平的红宝石调 Q 激光器发出激光的亮度比高压脉冲氙灯的亮度高 370 亿倍,比太阳表面的亮度高 200 多亿倍。如果进一步压缩激光束的发散角或将激光束聚焦,使激光能量在空间上高度集中,或者压缩激光束的脉冲宽度,使激光能量在时间上高度集中,还可使激光束的强度进一步提高。